滑带黄土孔隙微结构参数与动应力关系研究

任 权[1,2]，王家鼎[1]，谷天峰[1]，蔡同俊[2]
（1. 西北大学 地质学系/大陆动力学国家重点实验室，陕西 西安 710069；
2. 陕西省交通规划设计研究院 公路勘察设计院，陕西 西安 710068）

摘　要：以黄土滑坡滑带土孔隙微观结构为研究对象，并辅以定量化分析手段，研究不同试验条件下黄土滑坡滑带土微观结构的变化特征与动应力之间的关系。研究表明，滑带黄土的微观结构参数随着动荷载的增加呈现一定的规律性，其中孔隙数量、孔隙面积、孔隙形态比以及孔隙分形维数与动应力之间的关系可以用线性回归方程表示。

关键词：黄土滑坡；滑带土；微观结构；动应力
文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2013)01-0103-03　　**中图分类号**：P642.3

Relationships Between Porosity Micro-structure Parameters of Slide-zone Soil and Dynamic Stress

REN Quan[1,2], WANG Jia-ding[1], GU Tian-feng[1], CAI Tong-jun[2]
(1. *Department of Geology/The Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi* 710069, *China*; 2. *Shaanxi Provincial Communication Planning Design and Research Institute, Xi'an, Shaanxi* 710068, *China*)

Abstract: By taking the porosity micro-structure of slide-zone soil as an research object and employing quantitative analysis method, relationships between the variable characteristics of micro-structure of loess slide-zone soil and dynamic stress are studied under different experimental conditions. Results from the study show that the porosity micro-structure parameters of the loess soil present a certain regularity under increased consolidation stress, and there are linear relationships between the porosity micro-structure parameters (i. e., pore quantity, proportion, form ratio, average diameter and fractal dimension) and dynamic stress.

Keywords: loess landslide; slide-zone soil; micro-structure; dynamic stress

土体微观结构研究的目的是找寻微观结构变化与宏观力学性质之间的规律性，或者说是为了揭示宏观力学的微观机理。而近年来诸多学者的研究方向多集中于静力作用下土体微观结构的变化，而对正弦荷载作用下滑带土的微观结构的重视较少[1-2]，因此，本文拟从该方面对滑带黄土微观结构进行分析，以黄土滑坡滑带土微观孔隙结构为研究对象，辅以定量化分析为主要研究手段，研究其在不同试验条件下微观结构的变化与动应力之间的关系。

1　试验方法及数据来源

1.1　试样来源

本文所选土样取样地点为郑州市—西安市高速铁路潼关段典型的黄土滑坡。选择在滑坡侧壁相邻位置取样用于试验分析。试样选择在滑坡侧壁相邻位置取样用于试验分析，其应力状态可以代表滑带黄土在滑坡滑动之前的状态。原状黄土取样深度为 5～6 m，属 Q_3 黄土，试样各项基本物理力学参数如下：土粒比重取 2.71，天然密度 1.41～1.65 g/cm^3，孔隙比 1.02～1.12，含水量 10%～23%，塑限 15%～20%，塑性指数 6.7～13，黏聚力 10.7～30.3 kPa，内摩擦角 24.3°～28.2°。

1.2　试验方法及数据来源[3-10]

本文试验是在西北大学大陆动力学国家重点实验室的英国 GDS 动三轴仪上进行的动三轴试验以及 Quota 400 FEG 热场发射环境扫描电子显微镜进行的扫描电镜试验。

(1) 动三轴试验。试验选择标准尺寸为Φ50 mm×h100 mm 的土样进行不排水固结，固结完成后根据试验设计方案，分别在围压为 30，50，100 kPa 试

收稿日期：2012-01-16　　修回日期：2012-03-20
资助项目：国家自然科学基金项目“车辆长持时振动荷载作用下黄土滑坡机理研究”(40572157)
作者简介：任权(1982—)，男(汉族)，陕西省西安市人，博士研究生，主要从事工程地质及岩土工程研究。E-mail：284309765@qq.com。

验状态下，加载不同的轴向应力和动应力，从而获得各个试样的累积变形量。

（2）扫描电镜试验。动三轴试验结束后，将不同试验状态下的试样取下，经过脱水处理后，制作成实验室所需的标准试件进行扫描电镜试验，获得黄土微观结构的照片，并对其进行图像处理取得数据结果（表 1），进行分析对比研究，确定动力作用下的黄土微结构变化特征。

表 1 不同试验条件下滑带黄土微观结构参数

围压/kPa	动应力/kPa	主应力比	孔隙形态参数	孔隙平均直径/μm	孔隙面积/μm²	孔隙数量/个	孔隙分维数
30	25	1.83	1.52	1.00	131 701.3	12 562	1.121 2
30	35	2.17	1.74	0.95	109 846.7	12 495	1.12 61
30	50	2.67	2.24	0.88	80 053.7	14 055	1.131 4
30	80	3.67	2.33	0.84	73 573.0	16 469	1.135 2
50	30	1.60	1.38	1.01	153 700.6	10 736	1.113 6
50	50	2.00	1.75	0.95	159 657.9	12 083	1.125 4
50	80	2.60	2.15	0.93	133 795.9	13 541	1.134 7
50	100	3.00	2.38	0.88	109 573.0	18 469	1.140 5
100	50	1.50	1.35	1.18	166 865.0	11 432	1.117 8
100	80	1.80	1.57	0.96	141 786.9	12 233	1.120 8
100	100	2.00	1.65	0.91	137 058.0	14 220	1.127 8
100	125	2.25	1.97	0.85	102 664.4	18 031	1.131 9
100	160	2.60	2.34	0.67	58 363.5	20 040	1.136 7

2 结果与讨论

2.1 孔隙数量与动应力的关系

在一定的视域范围内，孔隙数量不仅可以反映土体中水和气体的含量，还反映了土颗粒与水、气体之间的相互作用与分布情况，这将进一步影响土体含水量、孔隙比、孔隙水压力等力学参数，由此可见，孔隙数量同土体宏观物理力学性质之间有一定的关系。图 1 为不同动应力条件下水平截面上孔隙数量与动荷载之间的关系曲线，可以看出土体中总孔隙个数随着动荷载的增加而增加，3 种围压状态下拟合方程均为线性方程 $y=Ax+B$，相关性较好。

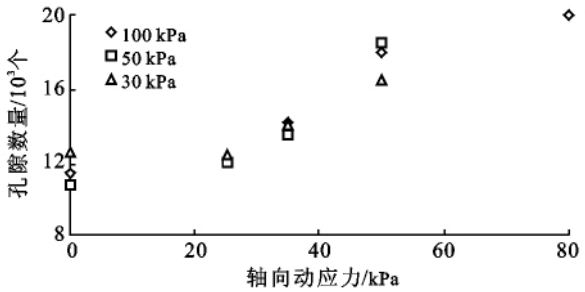


图 1 孔隙数量与动应力之间的关系

2.2 孔隙面积与动应力的关系

孔隙面积是表征宏观土体孔隙比、孔隙度的微观参数。图 2 为不同动应力条件下水平截面孔隙面积与动荷载关系曲线，曲线均为线性方程，说明水平截面孔隙面积与轴向动荷载之间存在良好的负相关。从图 2 可以看出，围压 30 kPa 作用下，水平截面孔隙面积随着动荷载的增加有逐渐减小的趋势，但是这种趋势有越来越缓的现象。这表明在围压 30 kPa 情况下，当动应力增加到一定程度时，土体中孔隙面积减小的速度越来越慢甚至不会再减小，这时候土体在正弦动荷载作用下，仍然可以产生振陷残余变形，但是从土体微观结构来看，这部分变形不是由孔隙面积减小而造成的，通过分析发现，这时候土体所产生的残余变形是由土颗粒的重新排列造成的。

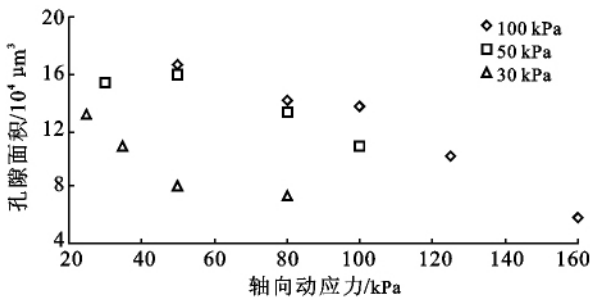


图 2 孔隙面积与动应力之间的关系

此外，发现总孔隙数量的增加和总孔隙面积的减少之间还存在着线性关系，由此看出这 2 个微结构参数是影响土体面孔隙比的重要因素。

2.3 孔隙平均直径与动应力的关系

孔隙平均直径是反映土体孔隙大小特征的重要参数。图 3 为不同动应力条件下水平截面孔隙平均

直径与动荷载关系曲线,从图 3 中可以看出,孔隙平均直径随着轴向动荷载的增加而减小,原因在于,随着轴向动应力的增加,滑带黄土开始产生残余变形,土体结构开始发生破坏,部分单粒或集粒破碎,充填相邻孔隙,从而造成孔隙平均直径的减小。

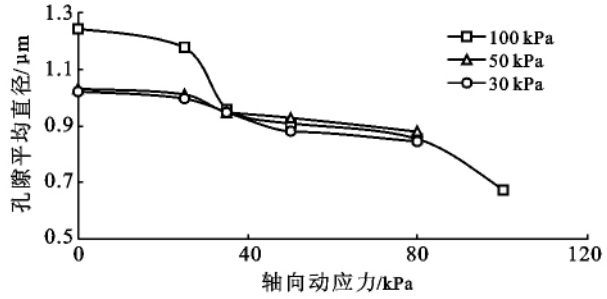


图 3　孔隙平均直径与动应力关系

2.4　形态参数与动应力之间的关系

在微结构研究中,形态比主要用来表征孔隙的形态,其可以描述孔隙形态在轴向动应力作用下的变化规律,其值越大,孔隙越趋近于长条形;形态比越接近 1,表明孔隙形状近于正方形或圆形(原状黄土孔隙近于圆形或椭圆形,少见近似方形孔隙)。根据不同动应力条件下孔隙形态比与轴向动荷载之间的关系曲线可以看出,围压 30 kPa 作用下随着动荷载的增加,孔隙形态比增加,但增加速率将会越来越小,表明土体孔隙逐渐由近圆形或椭圆形向长条形变化,当孔隙形态变化到一定程度后就不会再产生较大的形状变化。而在围压为 50,100 kPa 状态下时规律类似,但并未出现速率渐变的情况,此点反应的状况同孔隙面积与动应力的关系相同。

2.5　孔隙分形维数与动应力的关系研究

基于 GIS 分析计算,可以看出滑带黄土孔隙分形维数随着轴向振动荷载(振幅)的增加逐渐增大,这说明黄土孔隙微结构形态具有一定的分形特征。图 4 为不同围压下孔隙分形维数与动应力的关系曲线,从图 4 中我们可以看出,水平截面上,孔隙分形维数随着动应力的增加而增加,且各个围压下规律类似,均呈线性相关,在置信度为 0.05 条件下,相关性较好。这是由于土体遭受振动荷载后,中、大孔隙数量减少,土体界面起伏也就越小,所对应的土体也就越致密,导致孔隙分形维数变大。反之,分形维数越小时,土体界面也就越粗糙,此时,中、大孔隙明显存在,结构基本未发生破坏,土体结构状态与原状土相差无几。试验结果亦可以表现这一特征,在小动应力条件下,土体基本上不产生残余变形。

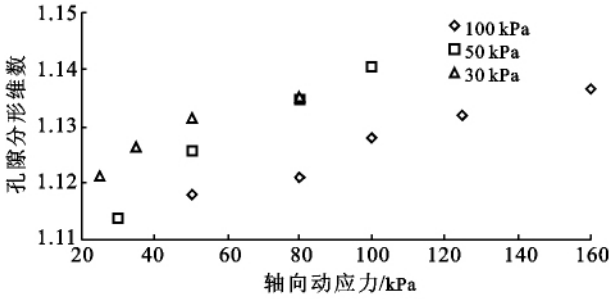


图 4　孔隙分形维数与动应力关系

3　结 论

(1) 土体在外荷载作用下表现的各种力学性质,实质上是其微观结构变化的一种宏观反映。通过对试验结果进行分析,我们发现滑带土体微观结构参数随着荷载的增加呈现一定的规律性,其中孔隙数量、孔隙面积、孔隙形态比与动应力之间的关系可以用简单的线性方程 $y=Ax+B$ 表示,这对土体微观结构力学、黄土微观结构力学模型的建立具有一定程度的指导意义。

(2) 孔隙分形维数随着动应力的增加而增加,两者呈线性相关,且在置信度为 0.05 条件下,相关性较好。但孔隙分形维数与滑带土体宏观力学性质之间的关系如何,却仍然处于初步研究阶段,下一步可以从这个方面深入进行研究。

[参 考 文 献]

[1] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京:地震出版社,2003.

[2] 谢定义. 土动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1998.

[3] Wang Lanmin, Wang Jun. Dynamic behaviors of loess under irregular seismic loading [C]// Proceedings of the Second International Conference on Earthquake Construction and Design. 1994:1987-1994.

[4] 彭社琴,赵其华,黄润秋. 成都黏土动三轴试验[J]. 研究地质灾害与环境保护,2002,13(1):57-60.

[5] 王家鼎,张倬元. 黄土动力学特性及黄土滑坡机理研究评述[C]// 人地谐和:张倬元教授八十华诞论文集. 北京:地质出版社,2006:78-82.

[6] 胡瑞林,王思敬,李向东,等. 21 世纪工程地质学生长点:土体微结构力学黄土压缩变形的微结构效应[J]. 水文地质工程地质,1999,26(4):5-8.

[7] 胡再强,谢定义,沈珠江. 黄土稳定孔隙比原理的试验研究[J]. 水利学报,2002(8):97-100.

[8] 任权,王家鼎,谷天峰,等. 高速铁路地基黄土微结构的分形研究[J]. 水文地质工程地质,2007,34(6):76-79.

[9] Hua Ruilin, Yeung Mingru, Lee Zhoufen, et al. Mechanical behavior and microstructural variation of loess under dynamic compaction [J]. Engineering Geology, 2001,59(3/4):203-217.

[10] 王清,王剑平. 土孔隙的分形几何研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(4):496-498.